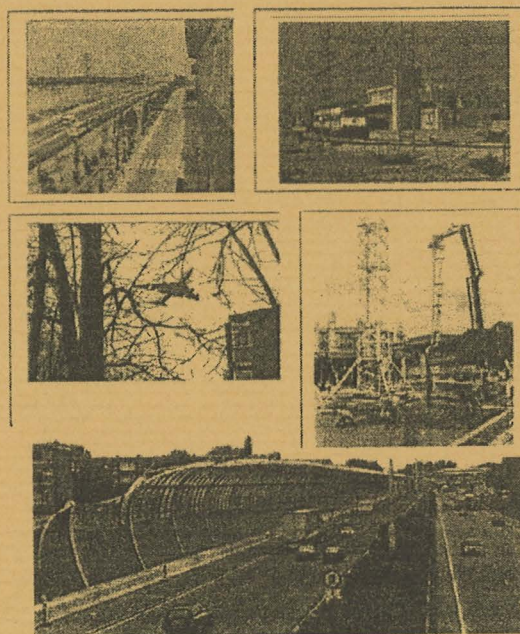


APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (III)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-03

APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (III)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-03

**CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA**

- 0 VARIOS
- 1 ESTRUCTURAS
- 2 CONSTRUCCIÓN
- 3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
- 4 TEORÍA
- 5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
- 6 PROYECTOS
- 7 URBANISMO
- 8 RESTAURACIÓN

NUEVA NUMERACIÓN

- 2 Área
- 51 Autor
- 03 Ordinal de cuaderno (del autor)

Apuntes de acústica en la edificación y el urbanismo (III)

© 2002 César Díaz Sanchidrián

Instituto Juan de Herrera.

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Composición y maquetación: Daniel Álvarez Morcillo.

CUADERNO 124.01 / 2-51-03

ISBN: 84-9728-021-0 (obra completa)

ISBN: 84-9728-029-6 (Apuntes III)

Depósito Legal: M-4005-2002

ÍNDICE

6 FUENTES DE RUIDO EXTERIORES A LOS EDIFICIOS

- 6.1 Introducción
- 6.2 El ruido de tráfico rodado.
 - 6.2.1 Características del ruido de vehículos aislados.
 - 6.2.2 La predicción de niveles sonoros producidos por el tráfico rodado.
 - 6.2.2.1 El modelo inglés CRTN.
 - 6.2.2.2 El método francés de la Guide du Bruit.
 - 6.2.2.3 Fórmula de cálculo predictivo de los niveles sonoros ambientales producidos por el tráfico rodado en Madrid.
 - 6.2.3 Amplificación de los niveles sonoros originados por la reverberación urbana.
 - 6.2.4 Los pavimentos porosos.
- 6.3 El ruido de ferrocarriles.
 - 6.3.1 Niveles sonoros producidos por los trenes.
 - 6.3.2 Predicción de niveles sonoros de ferrocarriles sobre vías rectas.
 - 6.3.3 Ferrocarriles subterráneos.
- 6.4 El ruido de aeronaves.
- 6.5 El ruido en la construcción.
- 6.6 Molestias producidas por el ruido de tráfico.

7 BARRERAS ACÚSTICAS

- 7.1 Introducción.
- 7.2 Tipos de barreras acústicas.
- 7.3 Atenuación del sonido mediante pantallas acústicas.
- 7.4 Pantalla acústica delgada muy larga.
- 7.5 Pantalla de longitud finita.
- 7.6 Barrera gruesa.
- 7.7 Mejora del comportamiento acústico de un terraplén con vegetación.

6.- FUENTES DE RUIDO EXTERIORES A LOS EDIFICIOS

6.1.- INTRODUCCIÓN

Se puede definir la contaminación acústica como la existencia de ruidos o vibraciones, producidos por cualquier tipo de foco emisor, que impliquen riesgo, daño o molestia para las personas, el desarrollo de sus actividades y bienes de cualquier naturaleza, o produzcan perjuicio para el medio ambiente. Según el proyecto de Directiva Europea el *Ruido ambiental*, es el sonido no deseado o nocivo generado por la actividad humana en el exterior, incluido el ruido emitido por medios de transporte, emplazamientos industriales o edificios industriales.

El ruido es considerado como una de las causas principales del deterioro ambiental que se padecen en pueblos y ciudades. Es el origen de perturbaciones en numerosas actividades (descanso, enseñanza, estudio, comunicación, etc.) y puede afectar a la salud de las personas, sobre todo, por la perturbación del descanso nocturno. El conocimiento de las fuentes de ruido exteriores e interiores a los edificios es importante para la ubicación de estos y determinar el aislamiento acústico exigible en los edificios en función de su uso. La situación y disposición de los volúmenes de edificación en el planeamiento urbanístico y, los cerramientos del edificio deben estar en consonancia con las fuentes de ruido en el medio circundante.

El aumento del tráfico de los medios de transporte y de la actividad industrial ha originado un importante aumento de la contaminación acústica. Las diferentes Administraciones han delimitado su territorio en diferentes áreas de sensibilidad acústica en el ambiente exterior e interior, en las que se pretende que tengan unas características acústicas homogéneas.

Las decisiones urbanísticas básicas deben ser correctamente planteadas con un conocimiento de los problemas que producen los medios de transporte. La legislación impone unas normas acústicas cada vez más restrictivas, lo que supone una mayor preparación de los equipos de urbanistas.

6.2.- EL RUIDO DE TRÁFICO RODADO

En las ciudades el automóvil se considera frecuentemente como el principal responsable de los problemas del tráfico urbano. Necesita vías de penetración en las ciudades, crea problemas de movilidad, de aparcamiento y obliga a una escala y un diseño diferente de las ciudades.

El ruido producido por el tráfico rodado se ha convertido en las últimas décadas en la fuente de ruido que afecta a mayor número de personas. El ruido de tráfico urbano e interurbano es el resultado de la contribución de diferentes fuentes individuales de ruido, (automóviles, camiones, autobuses, motos, etc.), todas ellas tienen diferentes espectros y características de emisión. Por otra parte, hay que tener en consideración el estado de la calzada, características geométricas de las calles por las que se circula, etc.

El ruido de un vehículo en circulación es el resultado de la superposición de los diversos ruidos producidos por el motor, sistemas de transmisión, neumáticos, carrocería,

sistema de escape, etc. Los sistemas de aire acondicionado de los vehículos son también una fuente importante de ruidos. Las Directivas de la Unión Europea obligan que las emisiones de ruido en los vehículos sean cada vez menores.

Los niveles de presión sonora producidos por el tráfico rodado dependen entre otras cosas, del porcentaje de vehículos pesados, pues estos son más ruidosos que el resto de los vehículos.

La caracterización del ruido generado por el tráfico exige conocer su espectro energético, su variación en el tiempo, por ello es necesario un tratamiento estadístico de los datos para obtener índices globales. La figura 6.1 muestra los espectros sonoros típicos producidos por el tráfico rodado a 10 m de la calzada en vías urbanas rápidas y en autopistas.

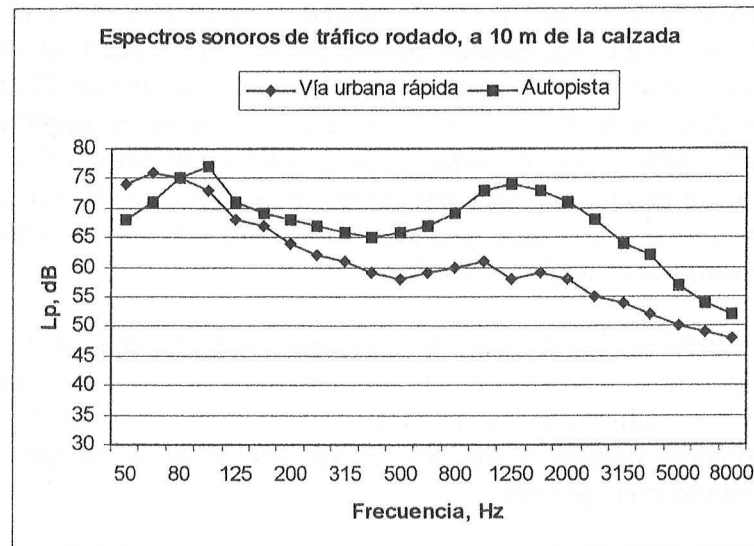


Figura 6.1. Espectros sonoros de tráfico de rodado, a 10 m de la calzada.

La evaluación de los niveles sonoros producidos por el tráfico puede realizarse a través de dos formas distintas: medición y predicción. Los métodos de medición consisten en la realización de mediciones acústicas *in situ* con la instrumentación adecuada. Los métodos de predicción se basan en el conocimiento de las teorías de emisión y propagación del sonido, éstas permiten calcular los niveles sonoros mediante simulación de situaciones reales o predecibles mediante modelos matemáticos o físicos. Generalmente se combinan los dos procedimientos.

Los métodos de medición son únicamente relevantes cuando se aplican a situaciones existentes, proporcionan información sobre una situación concreta espacio temporal. Se utilizan en la realización de mapas de ruidos y evaluaciones de barreras acústicas. Son imprescindibles en los procedimientos legales en relación con los efectos de la contaminación acústica.

Los métodos de predicción pueden utilizarse para situaciones existentes y para otras que se puedan imaginar. Sus costes son menores y pueden simularse diferentes escenarios, con diferentes intensidades de tráfico, tipos de pavimentos, condiciones atmosféricas, barreras acústicas, puntos de recepción, etc. Los modelos de predicción deben contrastarse y modificarse de forma continua a los niveles reales, teniendo en cuenta la

validez del método de previsión. *Es imprescindible su utilización por personas que tengan unos conocimientos de acústica adecuados.*

6.2.1.- CARACTERÍSTICAS DEL RUIDO DE VEHÍCULOS AISLADOS

En una autovía o en una autopista el tráfico está formado por un número de vehículos de diferentes tipos, clases, marcas y modelos, cuya distribución depende del tipo de vía y hora del día entre otros factores. Cuando se quieren calcular los niveles producidos por los vehículos, se suele asumir que hay tres tipos de vehículos: automóviles, camiones medios y camiones pesados. Las características del ruido emitido por estas tres clases de vehículos son necesarias para la predicción.

Ruido de camiones

El ruido producido por un camión en una autopista es función de su régimen de funcionamiento y puede considerarse como producido por dos fuentes principales independientes: el sistema de propulsión y las ruedas.

El ruido producido por el sistema de propulsión (motor, escape, entrada, ventilador y otros equipamientos auxiliares en el compartimento del motor), depende de la velocidad del motor seleccionada.

El ruido de rodadura se produce por la interacción entre las ruedas y la superficie de la carretera. Es debido a una combinación de la vibración de la carcasa y del mecanismo de atrapar y posteriormente liberar aire entre las huellas del neumático. Los niveles de presión sonora producidos por la rodadura están relacionados con la velocidad del vehículo. Para la mayoría de los tipos y diseños de neumáticos, el nivel de presión sonora aumenta de 10 a 12 dB ponderados A al duplicar la velocidad.

Ruido producido por automóviles

El ruido producido por automóviles es diferente al producido por los camiones, sus niveles sonoros son inferiores y su espectro es diferente. Se considera, como en el caso de los camiones, producido por el sistema de propulsión y la rodadura. La figura 6.2 muestra las principales fuentes de ruido en un automóvil.

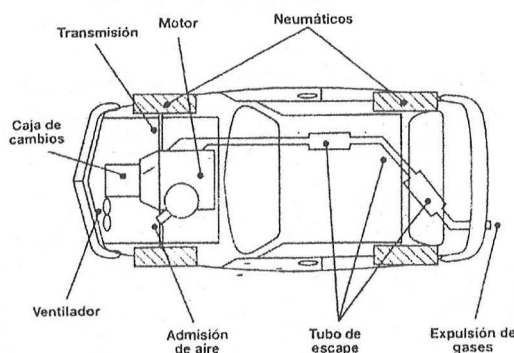


Figura 6.2: Principales fuentes de ruido en un automóvil

En las gráficas y tablas siguientes se muestran los resultados experimentales de las mediciones acústicas en diferentes situaciones de velocidad y flujo de tráfico.

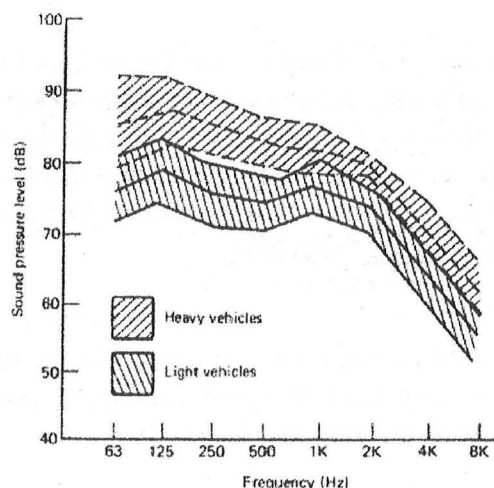


Figura 6.3: Espectros típicos de los vehículos en flujo libre

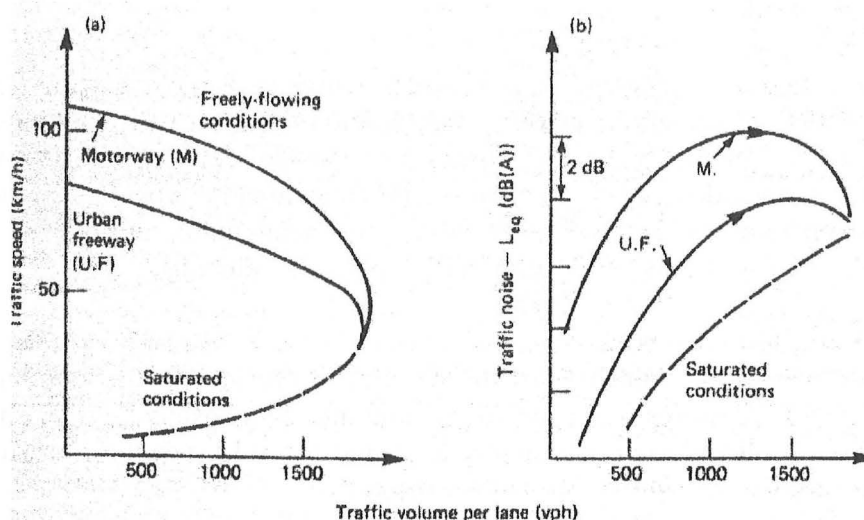


Figura 6.4: (a) Relación entre la velocidad media de los vehículos y el flujo de tráfico.
(b) Relación entre el nivel de presión sonora L_{Aeq} y el flujo de tráfico en distintas condiciones de tráfico.

Tipo de vehículo	Velocidad km/h	L_p , en dB, en cada una de las bandas de octava, Hz						L_{Ap}
		125	250	500	1000	2000	4000	
Automóvil	56	65	61	62	61	57	53	65
	88	71	68	66	68	66	60	72
Camión	56	87	84,5	81,5	78	74,5	70,5	83,5
	88	87,5	85	87,5	82,5	77	73,5	87,5

Tabla I: Niveles de presión sonora promedios medidos a 1,2 m del suelo a una distancia de 15 m para vehículos circulando por autopistas a dos velocidades diferentes.

6.2.2.- LA PREDICCIÓN DE NIVELES SONOROS PRODUCIDOS POR EL TRÁFICO RODADO

Todas las fórmulas de predicción existentes constan de una expresión matemática central a la que posteriormente se le aplican diferentes correcciones debidas a composición del tráfico y velocidad del mismo, pendiente de la vía, tipo de capa de rodadura, etc.

6.2.2.1.-EL MODELO INGLES CRTN (Calculation of Road Traffic Noise).

Fue uno de los primeros modelos para la predicción del ruido de tráfico. Según la versión de 1988, el parámetro básico a calcular es el L_{A10} para una hora o 18 horas. Se toma una distancia de referencia de 10 m, considerando vehículos ligeros, a una velocidad media de 75 km/h, la vía horizontal y la superficie de rodadura convencional. Se obtienen las relaciones:

$$L_{A10}(1h) = 42,2 + 10 \cdot \lg q \quad \text{dB} \quad [6.1]$$

$$L_{A10}(18h) = 29,1 + 10 \cdot \lg Q \quad \text{dB} \quad [6.2]$$

q es la densidad de tráfico en vehículos/hora, y Q el flujo total de vehículos en el intervalo de tiempo entre las 6 h y 24 h.

A estas ecuaciones se añaden modificaciones debidas a:

Composición del tráfico y velocidad del mismo

$$\Delta_1 = 33 \cdot \lg(V + 40 + \frac{500}{V}) + 10 \cdot \lg(1 + \frac{5p}{V}) - 68,8 \quad \text{dB}$$

donde: V es la velocidad media, en km/h durante el intervalo de tiempo de medida y p el porcentaje de vehículos pesados durante ese mismo intervalo.

Para pequeñas densidades de tráfico y distancias a la vía menores a la de referencia, se aplica la siguiente corrección a la expresión básica: $-16,6 \cdot \lg D \cdot \sqrt{\lg C} \quad \text{dB}$

$D = 30/d$, d es la distancia perpendicular a la vía, o a su prolongación.

$C = q/200$, o $C = Q/4000$.

Corrección debida a la pendiente de la vía:

$$\Delta_2 = 0,3G \quad \text{dB}$$

G es la pendiente de la vía en % con su signo.

Rugosidad de la capa de rodadura

$$\Delta_3 = 4 - 0,003p \quad \text{dB}$$

p es el porcentaje de vehículos pesados.

Corrección por distancia

1) Si el suelo es duro entre la calzada y el receptor

$$\Delta_4 = 10 \lg \frac{d}{13,5} \quad \text{dB}$$

d es la distancia al centro de la calzada desde el punto de recepción.

2) Si el suelo es blando entre la calzada y el receptor

$$\Delta_4 = -10 \lg \frac{d}{13,5} \text{ dB}$$

Corrección por ángulo de visión de la vía

Si en el punto de recepción únicamente se ve una parte de la calzada, siendo θ el ángulo que abarca el tramo de la calzada visible:

$$\Delta_5 = 10 \lg \frac{\theta}{180} \text{ dB}$$

Si sobre el punto donde queremos realizar la predicción existen varias calzadas, el nivel global se obtendrá componiendo los niveles sonoros debidos a cada una de ellas.

Para la mayoría de las situaciones:

$$L_{Aeq, 18h} = L_{A10} (18h) - 3 \pm 2 \text{ dB}$$

6.2.2.2.- EL MÉTODO FRANCES DE LA GUIDE DU BRUIT(simplificado)

La fórmula matemática utilizada para predecir los niveles sonoros generados por el tráfico en las vías urbanas o en carreteras con calzadas separadas es la siguiente:

$$L_{eq} = 20 + 10 \lg(Q_{VL} + E \cdot Q_{VP}) + 20 \lg V - 12 \lg(d + \frac{l_c}{3}) + 10 \lg(\frac{\theta}{180^\circ}) \text{ dB} \quad [6.3]$$

donde

L_{eq} es el nivel sonoro

Q_{VL} , Q_{VP} , número de vehículos pesados y ligeros

E , factor de equivalencia acústica entre vehículos pesados ($>3,5$ T) y ligeros ($<3,5$ T).

V , velocidad media de al menos el 50% de los vehículos en el intervalo de tiempo considerado, en km/h

d distancia al borde de la calzada en m

l_c , anchura de la calzada en m

θ , ángulo bajo el cual se observa la carretera, en grados sexagesimales.

El valor del factor de equivalencia E , es función del tipo de ruta y de su pendiente r

Pendiente	$r \leq 2\%$	$r = 3\%$	$r = 4\%$	$r = 5\%$	$r \geq 6\%$
Carretera de calzadas separadas (autovía, autopista)	$E = 4$	5	5	6	6
Carretera, vía rápida urbana	$E = 7$	7	10	11	12
Vía tipo bulvar	$E = 10$	13	16	18	20

En vías rápidas se suelen considerar las siguientes velocidades:

Autovía: $v = 100$ km/h; vía rápida urbana: $v = 80$ km/h, bulvar: 60-80 km/h.

En el caso de calzadas dobles con una banda central de separación muy ancha, el resultado es la composición de cada una de las calzadas por separado.

6.2.2.3.- FÓRMULA DE CÁLCULO PREDICTIVO DE NIVELES SONOROS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR EL TRÁFICO RODADO EN MADRID.

$$L_{Aeq} = C + C_T \cdot \lg (Q + 1900 q) ; \pm 1 \text{ dB} \quad [6.4]$$

Expresión donde:

C = 42,4 en período día

C = 44 en período noche

Q, es el número total de vehículos/hora

q, número de vehículos pesados/hora

C_T, es una constante de transformación, que se establece

C_T = 4,40829 en período día

C_T = 4,07442 en período noche

A efectos de la Ordenanza de Protección del Medio Ambiente Urbano del Ayuntamiento de Madrid, el día se divide en dos períodos: el diurno constituido por 16 horas continuas de duración y comienzo a las 7 h, (7- 23 h), y el nocturno, constituido por las restantes ocho horas, (23- 7 h). En días festivos, el período diurno se reduce a 15 horas continuas de duración y comienzo a las ocho horas.

6.2.3.- AMPLIFICACIÓN DE LOS NIVELES SONOROS ORIGINADOS POR LA REVERBERACIÓN URBANA.

En zonas urbanas la presencia continua de edificios altos a uno y otro lado de la vía aumenta los niveles de presión sonora, a causa de las sucesivas reflexiones sobre las fachadas, produciendo la reverberación urbana.

En una vía urbana con perfil en U, para un carril de tráfico, el incremento del nivel de presión sonora debido a la reverberación urbana se puede calcular mediante la expresión:

$$\Delta L_{rev} = 10 \cdot \lg \left[1 + \left(\frac{r}{r + 2d_{fachada}} \right)^2 (1 - \alpha) \right] + R \text{ dB} \quad [6.5]$$
$$R = 4 \left(\frac{h_{edif}}{w_{calle}} \right) \leq 3$$

donde: r, es la distancia perpendicular del tráfico al receptor; d_{fachada} es la distancia entre el receptor y la fachada del edificio más próximo; α es el coeficiente de absorción de la fachada del edificio, h_{edificio} es la altura del edificio; w_{calle} es la anchura de la calle.

La reverberación urbana depende de la forma de las fachadas de los edificios y de su absorción. Predicciones más precisas son posibles con modelos reducidos o con programas de simulación mediante ordenadores.

En 1971, de los resultados de un trabajo realizado por el CSTB, se analizó cual era la influencia sobre el nivel de presión sonora de los edificios, en vías uniformemente cubiertas de vehículos. Las fachadas de los edificios estudiados eran relativamente lisas, con un coeficiente de absorción sonora α . La figura 6.5 muestra la variación del nivel de presión sonora frente a una fachada en función de la relación entre su altura h y el ancho L de la vía. El nivel de referencia es el nivel que se mediría a la distancia L de la vía, junto al suelo, si esta se hallara libre de obstáculos.

Se comprueba que en una vía en U, el nivel de presión sonora es prácticamente independiente de la altura del punto de observación. El cálculo no se aplica a los últimos pisos de los edificios a causa de los fenómenos de difracción.

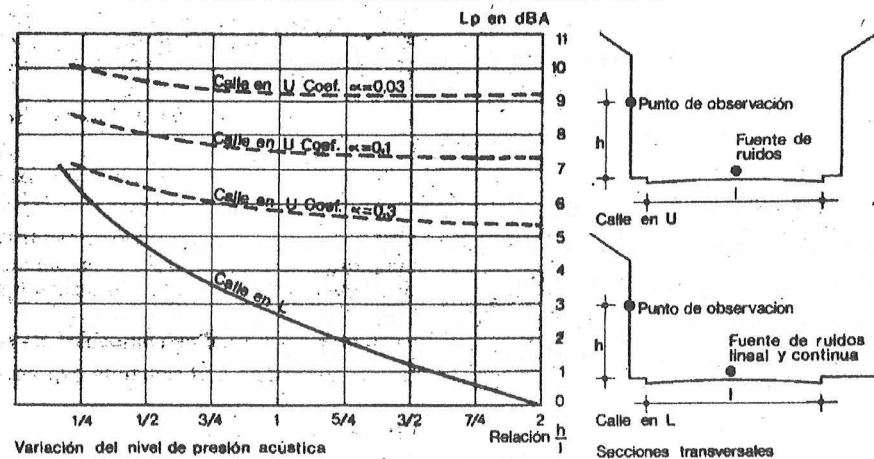


Figura 6.5: Variación del nivel de presión sonora frente a una fachada en función de la relación entre su altura h y el ancho L de la vía

En París en un trabajo de campo realizado en 1971 se halló para calles en U, una relación entre el nivel medio horario L_{A50} del ruido en la fachada de los edificios, el flujo de vehículos hora, Q , que circula en ese momento por la calle y la anchura de la misma, L , en m. Este valor es:

$$L_{A50} = 15,5 \cdot \lg Q - 10 \cdot \lg L + 36 \text{ dB}$$

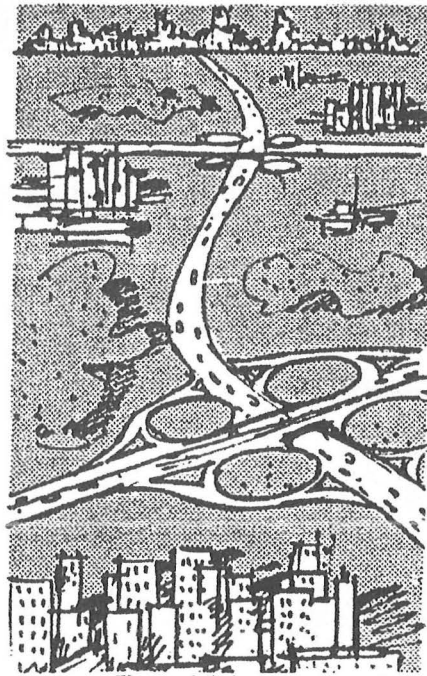
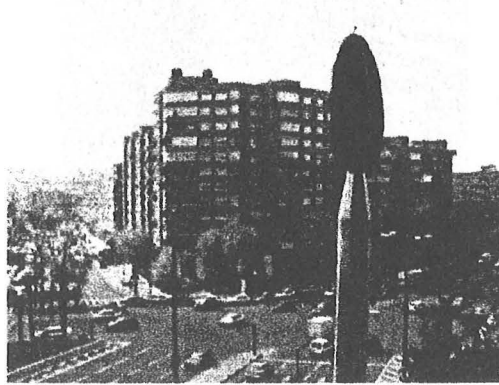
6.2.4.- LOS PAVIMENTOS POROSOS.

Una de las innovaciones para mejorar la seguridad y comodidad en el tráfico de vehículos en las vías de circulación en días de lluvia fue la utilización de materiales porosos, estos permiten el drenaje del agua hacia los márgenes de la carretera y una mejora de la visibilidad durante la conducción al disminuir las reflexiones de la luz sobre el pavimento y las proyecciones de agua. Desde el punto de vista acústico la colocación de pavimentos porosos disminuye el ruido de rodadura de los vehículos y aumenta la absorción acústica del pavimento, con lo que se disminuyen los niveles sonoros en las proximidades de las vías de circulación.

El ruido de rodadura se genera básicamente por las vibraciones radiales del neumático y las del aire confinado entre el pavimento y el neumático. Experimentalmente se comprueba la relación que existe entre el ruido de rodadura y la textura del pavimento y que a velocidades superiores a 60 km/h el ruido de rodadura es el predominante en un vehículo.

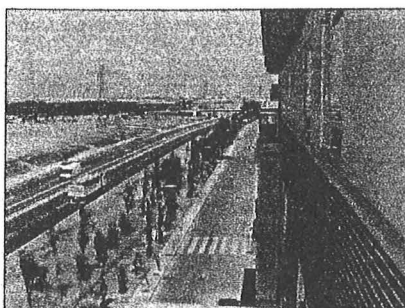
Se comprueba experimentalmente que a velocidades superiores a 70 km/h, el espesor óptimo del pavimento es de 40 mm para tener la mayor absorción acústica en el rango más amplio de frecuencias.

La atenuación acústica de un asfalto poroso en buen estado de mantenimiento, medido al lado de la carretera es en general del orden de 3-5 dB ponderados A.



El automóvil necesita vías de penetración en las ciudades, crea problemas de movilidad, de aparcamiento y obliga a una escala y un diseño diferente de las ciudades.

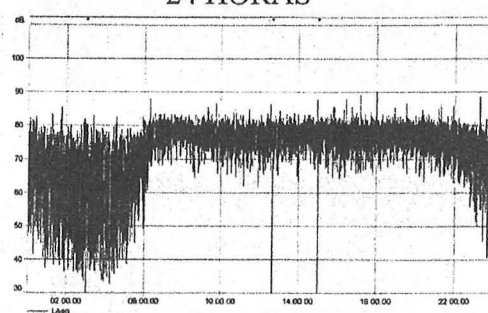
EJEMPLO: NIVELES SONOROS MEDIDOS EN LA FACHADA DE UN EDIFICIO SITUADO AL LADO DE UNA AUTOVÍA.



M-406, LEGANES, MADRID.

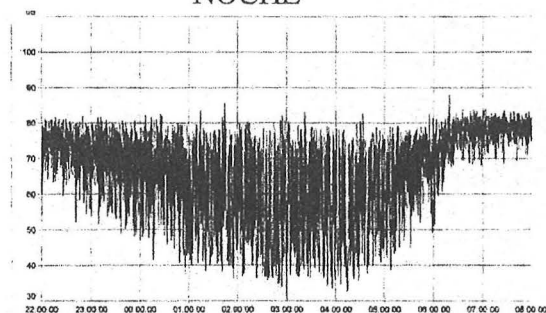
Se muestran los resultados de los niveles sonoros medidos en un día típico y su distribución estadística.

24 HORAS



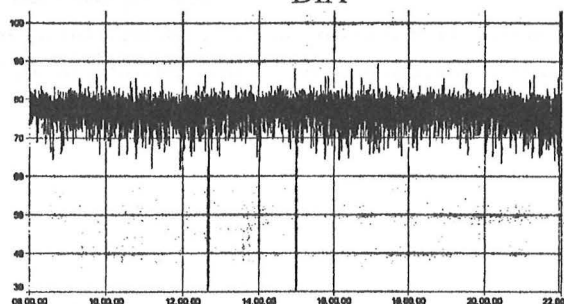
Nombre	Hora de inicio	Duración	LAeq	LAFMax	LAFMin	LAF1	LAF5	LAF10	LAF50	LAF90	LAF95	LAF99
Nivel Total	6/6/01 0.00	24.00.00	76,4	92	32,1	81,7	80,4	79,7	75,9	57,2	48	38,9

NOCHE



Nombre	Hora de inicio	Duración	LAeq	LAFMax	LAFMin	LAF1	LAF5	LAF10	LAF50	LAF90	LAF95	LAF99
Nivel Total	6/6/01 22.00	10.00.00	73,5	89,9	32,1	81,3	79,6	78,3	69,4	46,2	41,5	37,1

DÍA



Nombre	Hora de inicio	Duración	LAeq	LAFMax	LAFMin	LAF1	LAF5	LAF10	LAF50	LAF90	LAF95	LAF99
Nivel Total	6/6/01 8.00	14.00.00	77,7	92	60,6	81,9	80,7	80	77,3	73,5	72,1	69

Superficie muy reflectante
(asfalto, agua).

Superficie absorbente
(suelo natural)

Barrera de 3 m de altura

Terraplén de 5 m de altura

Terraplén de 5 m de altura y
barreras de 2 m de altura

Zanja de 5 m de profundidad

Trinchera de 5 m de profundidad
Laterales reflectantes

Trinchera de 5 m de profundidad
Laterales absorbentes acústicos.

Trinchera de 5 m de profundidad
parcialmente cubierta

Trinchera de 5 m de profundidad
cubierta completamente

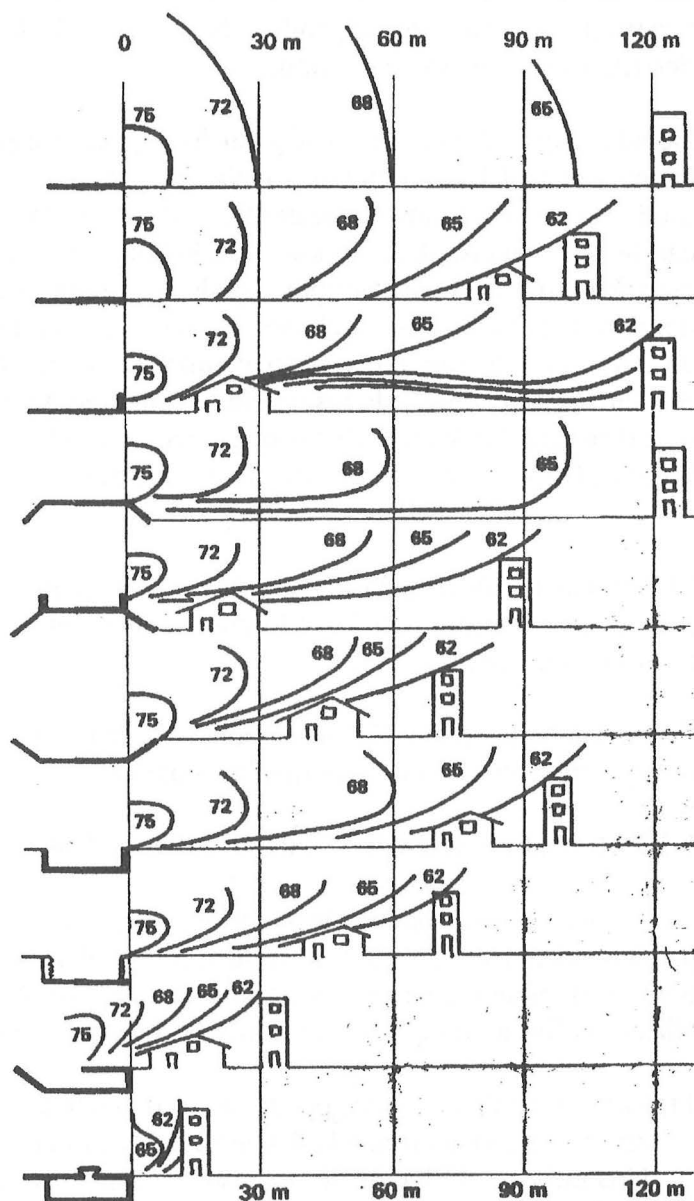


Figura 6.6: Vista en sección de la propagación del ruido de tráfico en situaciones diferentes. El L_{Aeq} de las líneas isófonas se ha simulado para un tráfico rodado de 2000 vehículos/hora. El L_{Aeq} en la fachada de la vivienda y/o el bloque de tres alturas es de 62 dB

6.3.- EL RUIDO DE FERROCARRILES

El ferrocarril es uno de los medios de transporte más efectivo. Con el aumento de la población en las grandes ciudades y el transporte de productos, ha aumentado de forma espectacular el número de operaciones ferroviarias y en consecuencia el impacto acústico del ferrocarril. Las molestias producidas por el ruido de los ferrocarriles de superficie en una zona dependen del número de trenes que circulen por ella en un determinado intervalo de tiempo.

Debido a que el tren va guiado, su localización espacial es fácil y su percepción es característica debido al efecto Doppler. Por otra parte, en la cercanía de las estaciones se producen otros ruidos característicos de chirridos, golpeteo de vagones, ruido de cambios de agujas, etc. El ruido emitido por un tren tiene múltiples orígenes; se pueden clasificar en tres grandes grupos: ligados a la rodadura (conjunto rueda-rail, disposición de las vías-traviesas, obras civiles, bogies, carrocería), ligados al sistema de propulsión de vagones y locomotoras, a su equipamiento auxiliar, y al ruido aerodinámico. El espectro en frecuencias de los niveles sonoros producidos por los trenes es característico y se distingue fácilmente de los originados por otros medios de transporte, predominan las altas frecuencias debido a que la causa principal es la interacción entre la rueda y el rail.

El ferrocarril subterráneo no contribuye a aumentar los niveles sonoros ambientales, pero puede ocasionar en los edificios situados en su proximidad niveles molestos de ruidos y vibraciones.

En las encuestas realizadas a la población, se comprueba que las molestias producidas por el ferrocarril son menores que las producidas por el tráfico rodado.

6.3.1.- NIVELES SONOROS PRODUCIDOS POR LOS TRENES

Se conoce con el nombre de *firma acústica* de un tren, a la evolución del nivel de presión sonora en un punto, producido por el paso de un tren en el transcurso del tiempo. Habitualmente se expresa con ponderación A. Una característica común a todas ellas es la forma trapezoidal de la envolvente, que consta de:

- 1) Parte inicial con una pendiente pronunciada, que varía con la velocidad de aproximación del tren y la distancia del punto de medición a la vía.
- 2) Una meseta, producida por el paso del tren frente al punto de medición, depende del número de locomotoras y vagones del tren. Es de destacar la longitud de la meseta de algunos trenes de mercancías con un número de vagones superior a cien. El nivel de presión sonora en la meseta se llama L_{Amax} , medido en dB ponderados A, depende del tipo de tren, de su velocidad y de la distancia de la vía al punto de medición.
- 3) Parte final, debida al alejamiento del tren, con un decrecimiento más lento.

Algunos valores aproximados del nivel de presión sonora en la meseta, L_{Amax} en trenes franceses y españoles se indican en la Tabla II.

Tipos de trenes	Velocidad, km/h	L_{Amax} dB	
		$d_0 = 7,5$ m	$d_0 = 25$ m
Cercanías	100		79
Cercanías	120		81
Rápidos	200	104	97
Expresos	140	97	92
Correos	100	96	89
Mercancías	80	93	86
ETG	155	96	91
TVG	270	105	97
<u>Trenes españoles</u>			
AVE	300		94,5
TALGO	200		96

Tabla II. Niveles de presión sonora en la meseta, L_{Amax} en trenes franceses y españoles

El tiempo de exposición de un receptor al ruido del tren es igual a la duración que separa el instante de aparición del ruido y el de su desaparición. La aparición del ruido del tren depende de los niveles sonoros ambientales del lugar; por ejemplo en un área de niveles sonoros bajos el ruido originado por el tren aparece pronto y su duración es larga. En consecuencia es necesario establecer un criterio independiente del lugar en donde estudiemos el nivel de presión sonora producido por el paso de un tren.

El tiempo de exposición al paso de un tren, t_e , se define generalmente como el tiempo transcurrido entre los dos puntos $L_{Amax} - 10$ dB. Véase la figura 6.7. Los investigadores, tras numerosas campañas de medidas de campo, coinciden en que el tiempo de exposición es función de la longitud del tren, de su velocidad y de la distancia del receptor al eje de la vía.

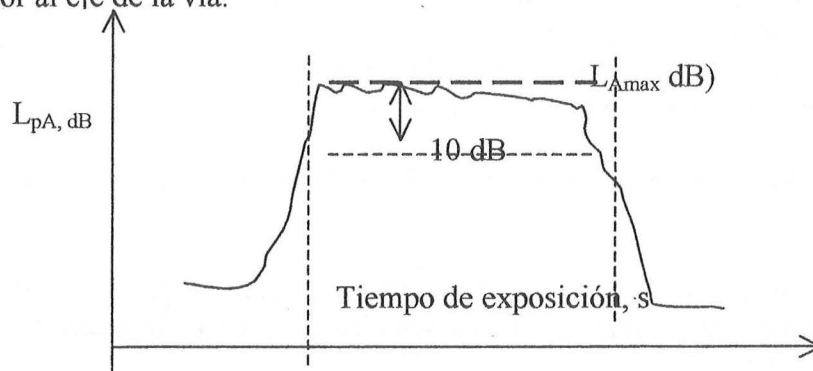


Figura 6.7: Tiempo de exposición al ruido de un tren.

El C.S.T.B (Francia), recomienda la expresión siguiente para el cálculo del tiempo de exposición:

$$t_e = \frac{L}{v} \sqrt{\left(\frac{2d}{L}\right)^2 + 1} \quad s \quad [6.6]$$

L , es la longitud del tren en m; v , su velocidad en km/h; y d , la distancia del receptor al eje de la vía en m. Generalmente suele utilizarse una fórmula aproximada, cuya expresión es:

$$t_e = \frac{3,6.L}{v} + \frac{6d}{100} \quad s \quad [6.7]$$

La figura 6.8 muestra los niveles de presión sonora ponderados A en el andén de una estación en función del tiempo, mientras un tren rápido entra o sale de la estación.

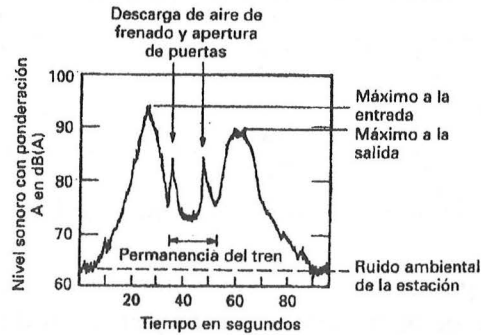


Figura 6.8: Evolución temporal de los niveles sonoros de un tren rápido en una estación.

6.3.2.- PREDICCIÓN DE NIVELES SONOROS DE FERROCARRILES SOBRE VÍAS RECTAS

El nivel de presión sonora producido en un punto por el paso de un tren, depende fundamentalmente de cuatro factores:

- 1) Del tipo de tren, que produce un nivel de presión sonora de referencia L_0 , dB, a la velocidad de referencia v_0 , km/h, y a una distancia d_0 , m.
- 2) Velocidad del tren, v , km/h
- 3) Distancia entre el receptor y el eje de la vía, m
- 4) Corrección en función de la directividad.

6.3.2.1.- Modelo de previsión del nivel de ruido máximo L_{max} producido por el paso de un tren

El nivel máximo de presión sonora, en dB ponderados A, producido por el paso de un tren de un tipo determinado, con una velocidad v y a una distancia d del eje de la vía, viene dado por:

$$L_{A \max} = L_{A0} + 30 \lg \left(\frac{v}{v_0} \right) - k \cdot \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) - k_d \quad dB \quad [6.8]$$

L_{A0} es el nivel de referencia. k_d es un coeficiente dependiente de la directividad. El valor del coeficiente k , es próximo a 10 cuando el tren es largo, (propagación cilíndrica), y próximo a 20 cuando el tren es corto, (fuente puntual). Esta expresión se puede aplicar hasta distancias de 250 m de la vía, *en campo libre*, para velocidades de circulación comprendidas entre 40 y 300 km/h, sobre raíles largos, colocados sobre traviesas de hormigón y balasto.

Nivel de referencia

Es difícil fijarlo para un tipo de tren debido a la gran cantidad de factores que influyen. La dispersión de valores es alta para una determinada velocidad y con material móvil del mismo tipo, debido al estado de la vía, trenes, etc. Suelen encontrarse dispersiones del orden de ± 5 dB ponderados A.

En consecuencia no existe un valor preciso de L_{A0} de referencia. Como niveles de referencia se pueden tomar algunos valores de trenes franceses y otros de los trenes españoles AVE y TALGO obtenidos por el CEDEX. Véase la Tabla III.

Coeficiente k

En este coeficiente se integran los elementos geométricos de atenuación, (longitud y tipos de trenes), así como los efectos de absorción del aire. Su valor se fija según los datos experimentales. La Tabla IV muestra los resultados obtenidos en los ferrocarriles franceses.

TIPO DE TREN	Longitud media, m	Valores de referencia		
		d_0 , m	v_0 , km/h	L_{A0} , dB
Cercanías	100	25	100	79
Cercanías	100	25	120	81
Metro	75	7,5	60	79
Mercancías	325	25	80	86
Mercancías	325	25	100	88
Automotor	40	25	120	87
Automotor	40	25	155	91
TALGO	250	25	200	96
AVE	240	25	300	94,5

Tabla III. Valores de referencia

TIPO DE TREN	Valores de k
Trenes largos: mercancías	12
Trenes de longitud media: rápidos, expresos, TALGO, AVE	15
Trenes cortos: cercanías	16
Máquina aislada, automotor	20

Tabla IV. Valores de k

Efecto de la directividad, k_d

En un eje perpendicular al eje del tren, se debe considerar una disminución del nivel de presión sonora debido al efecto pantalla que produce el chasis de los vagones. Esta disminución, únicamente se produce para valores de ángulo superiores a 30° respecto de la horizontal y sigue la expresión experimental:

$$k_d = M\alpha + N \quad \text{dB, } \alpha \text{ en grados} \quad [6.9]$$

k_d ; es la disminución en dB ponderados A, M y N son coeficientes experimentales, que por ejemplo en Francia se han fijado en : $M = 0,15$, $N = - 4,5$.

Aplicado a la expresión de k_d se obtienen los siguientes valores:

Ángulo α formado por el rayo acústico y la horizontal en grados	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
k_d	0	0	0	15	3	45	6	75	9

6.3.2.2.- Modelo de previsión del tráfico ferroviario, L_{AeqT}

El conocimiento del nivel máximo de presión sonora producido por el paso de los trenes, no es suficiente para caracterizar su impacto ambiental. Por ejemplo, dos trenes pueden producir el mismo nivel máximo, pero su tiempo de paso puede ser diferente, en consecuencia la energía acústica que recibe un observador será distinta, es decir, el L_{Aeq} será diferente.

Para una duración del paso del tren de T s, se define el nivel sonoro continuo equivalente como:

$$L_{AeqT} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1 L_p(t)} dt \right) \quad [6.10]$$

donde $L_p(t)$ es el nivel de presión sonora instantánea.

En el caso de que circule *un único tren* durante el intervalo de referencia T :

$$L_{AeqT} = 10.1 \lg \left[\left(\frac{t_e}{T} \right) \cdot 10^{0.1 L_{Aeq}(t_e)} \right] + K_{reflex} - K_{misc} \quad [6.11]$$

donde

t_e ; es el tiempo de exposición en segundos. T ; intervalo de tiempo en segundos, durante el cual se va a calcular el L_{Aeq} . $L_{Aeq}(t_e)$; nivel sonoro al paso de un tren. K_{reflex} ; coeficiente de corrección debido a reflexiones. $K_{reflex} = 0$, para condiciones de campo libre. Para puntos de observación situados a menos de 2 m de una fachada, $2 \leq K_{reflex} \leq 3$. K_{misc} , representa las correcciones debidas a diversos efectos que pueden producir obstáculos, desmontes y terraplenes, suelos, etc.

El método de predicción se suele aplicar para campo libre.

En campo libre, el nivel sonoro continuo equivalente de un intervalo T , para el paso de un tren es:

$$L_{AeqT} = L_{Amax} + 10 \lg \left(\frac{t_e}{T} \right) \text{ dB} \quad [6.12]$$

6.3.2.3.- L_{AeqT} de un conjunto de trenes

Teniendo en cuenta el número de trenes que circulan por la vía considerada, podemos calcular el nivel sonoro continuo equivalente, producido por todos ellos en un intervalo de tiempo T , L_{AeqT} .

$$L_{AeqT}(n \text{ trenes}) = L_{AeqT}(1 \text{ tren}) + 10 \lg n \quad [6.13]$$

Para trenes que circulan en curvas de un radio de curvatura inferior a 100 m, el ruido predominante, suele ser un chirrido de altas frecuencias, debido a la rodadura y deslizamiento de las ruedas sobre el raíl.

6.3.2.4.- Previsión de niveles sonoros producidos por el paso de trenes.

Para obtener el L_{AeqT} , hay que proceder de la forma siguiente:

- 1) Agrúpense el número de trenes según categorías.
- 2) Calcular para cada tipo de tren, el $L_{Aeq}(t_e)$ de un tren, en función de la velocidad del tren, distancia entre el receptor y la vía y niveles de referencia L_{A0} .
- 3) Calcular en función del nivel sonoro $L_{Aeq}(t_e)$ y del tiempo de exposición t_e , el nivel continuo equivalente de un tren en el intervalo T , L_{AeqT} , para cada una de las categorías de trenes durante el tiempo T considerado.
- 4) Añadir de 2 a 3 dB al nivel calculado si se quiere conocer el L_{AeqT} resultante en la fachada de un edificio. $K_{reflex} = 3$. El valor K_{misc} es difícil de valorar y su cálculo únicamente se realiza en procedimientos informáticos más completos.
- 5) Considerar el número de trenes según categorías que circulan por la vía en el intervalo temporal T . Calcular el L_{AeqT} de n trenes, para cada categoría de trenes.
- 6) Componer los niveles sonoros debido a cada categoría de trenes.

6.3.3.- FERROCARRILES SUBTERRÁNEOS

El ferrocarril subterráneo no contribuye a aumentar los niveles sonoros ambientales. La vibración de los sistemas del ferrocarril es transmitida al terreno circundante y a las estructuras, penetra en los edificios y puede originar en los que están en la proximidad de los túneles niveles molestos de ruidos y vibraciones, e incluso peligro para las estructuras de los edificios. En la figura 6.9 se muestra un esquema de los mecanismos básicos de propagación de las vibraciones de un tren subterráneo.

Las ruedas del tren circulando sobre la vía generan vibraciones que se transmiten por el sistema de sustentación de la vía hasta la estructura del túnel. La vibración de esta estructura puede ser transmitida a través del terreno hasta los edificios próximos. Existen diversos procedimientos para controlar las vibraciones a través del terreno mediante colocación de amortiguadores de vibración, mantenimiento de las instalaciones, remaches elásticos para raíles, bases elásticas de los balastos, losas flotantes, etc. Otro procedimiento para reducir las vibraciones del terreno es la construcción de zanjas sobre la superficie próxima a la vía, para que sea eficaz su base debe estar al menos 0,6 veces la longitud de las ondas de Rayleigh por debajo de la fuente que vibra. (Las ondas de Rayleigh son ondas superficiales se propagan a lo largo de las superficies de las capas del medio cuyo espesor sea mayor que la longitud de la onda longitudinal, está amortiguada transversalmente, es decir, su amplitud es máxima en la superficie y disminuye exponencialmente al aumentar la distancia a la superficie). En la mayoría de los suelos la zanja debe tener al menos una profundidad de 5 m para ser eficaz y estar rellena de material antivibratorio o de calidad inerte.

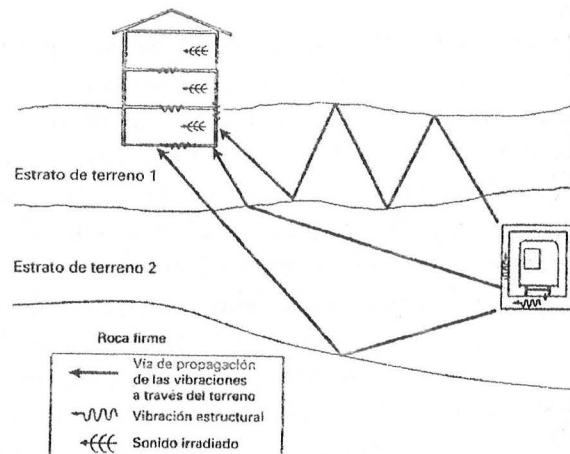


Figura 6.9: Esquema de los mecanismos básicos de propagación de las vibraciones de un tren subterráneo.

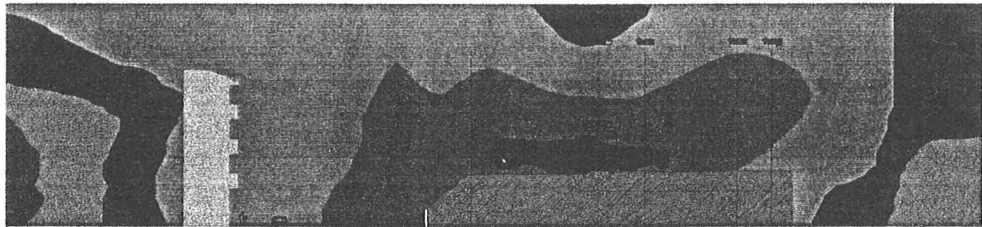


Figura 6.10: Simulación de los niveles sonoros en la fachada de una vivienda, originados por el ferrocarril y una vía de doble dirección.

6.4.- EL RUIDO DE AERONAVES

De todos los medios de transporte, los aviones son los que emiten mayor cantidad de energía acústica, lo que unido a su dependencia de los aeropuertos hace que las molestias que se ocasionan en las localidades situadas en sus inmediaciones sean verdaderamente importantes.

El ruido de los aviones y aeropuertos puede analizarse en relación con los efectos que produce sobre 1) la tripulación y los pasajeros; 2) mecánicos y personal de tierra, 3) las personas que habitan o trabajan en su proximidad.

Los niveles sonoros en los aeropuertos son debidos a causas muy variadas, destacando entre ellas las operaciones de vuelo y las operaciones de tierra.

De forma general, los niveles máximos de ruido producidos por un avión se producen en la operación de despegue, pues se exige a los motores el máximo de potencia; le sigue en importancia el sobrevuelo, y por último, el aterrizaje, en esta última operación el nivel de los ruidos generado es del orden de 20 dB inferior al de vuelo normal. La duración del sobrevuelo en la operación de despegue es mucho mayor que en el aterrizaje.

Los aviones de hélice producen ruidos en los que predominan las bajas frecuencias y los aviones de reacción originan ruidos debidos a las turbulencias procedentes de la mezcla de gases de los reactores.

La emisión del ruido de un avión es muy direccional. La máxima intensidad sonora se produce hacia atrás, siguiendo aproximadamente un cono de revolución cuyo eje coincide con el aparato, y cuya generatriz forma con dicho eje un ángulo de 30 a 45°.

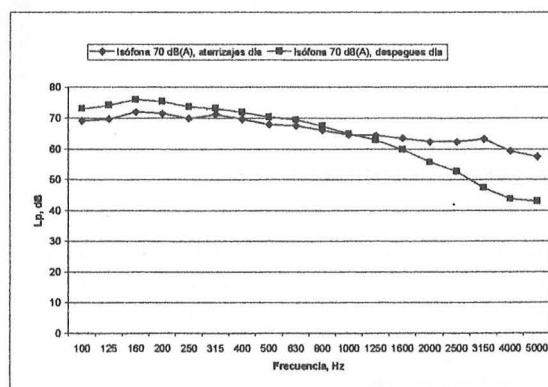


Figura 6.11: Espectros de las curvas isófonas de 70 dB ponderados A en operaciones de aterrizaje y despegue.



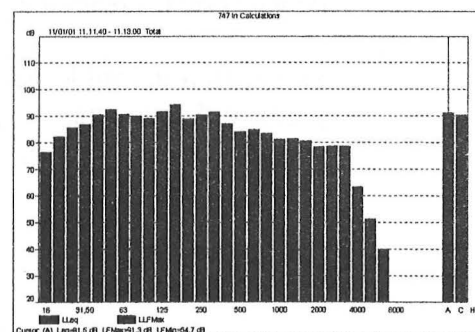
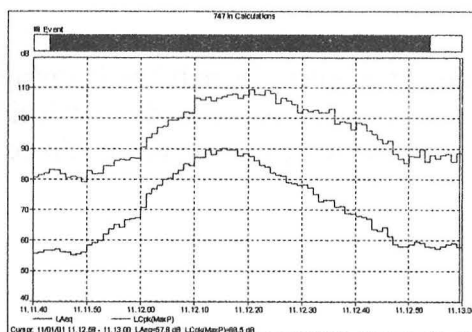
Figura 6.12: Sobrevuelo de un avión en la proximidad del aeropuerto de Barajas.

COMPARACIÓN DEL PERFIL SONORO Y EL ESPECTRO ENTRE LAS OPERACIONES DE ATERRIZAJE Y DESPEGUE DE UN AVIÓN TIPO B-747-200

Se muestran, para su comparación, los resultados de la medición de los sobrevuelos de un avión modelo B-747-200, tanto en operaciones de despegue como de aterrizaje.

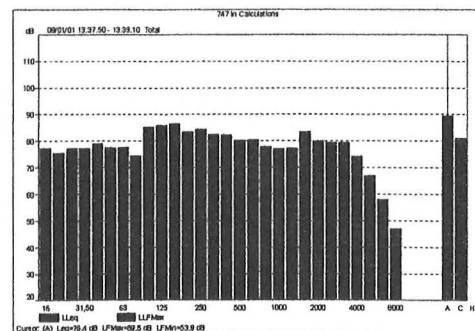
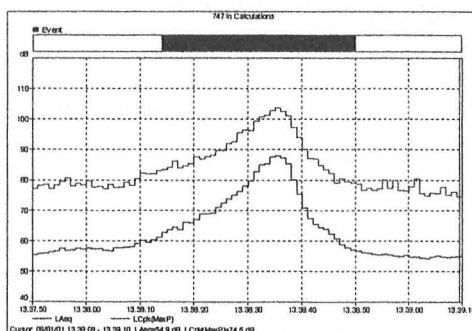
B-747-200 en operación de despegue:

Nombre	Tiempo de inicio	Duración	LAeq [dB]	LAFMax [dB]	LAFMin [dB]	LAX(SEL) [dB]	Tipo de Avión
Sobrevuelo 29	11/1/01 11.11	0.01.11	82	91,3	54,7	100,5	B-747-200



B-747-200 en operación de aterrizaje:

Nombre	Tiempo de inicio	Duración	LAeq [dB]	LAFMax [dB]	LAFMin [dB]	LAX(SEL) [dB]	Tipo de Avión
Sobrevuelo 47	9/1/01 13.38	0.00.36	79,8	89,5	56,6	95,4	B-747-200



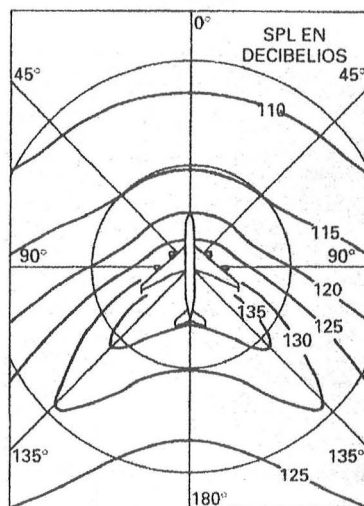
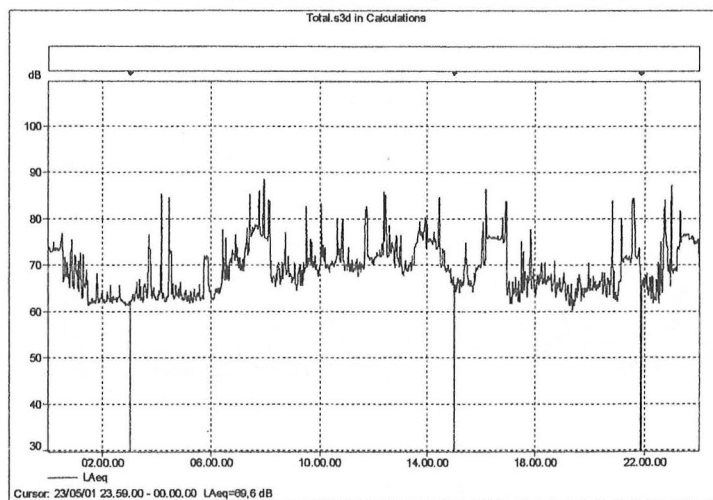


Figura 6.13: Distribución del nivel de presión acústica de un avión en tierra, funcionando sus motores a la máxima potencia.

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES SONOROS ORIGINADOS POR LAS OPERACIONES EN TIERRA EN EL AEROPUERTO DE BARAJAS.

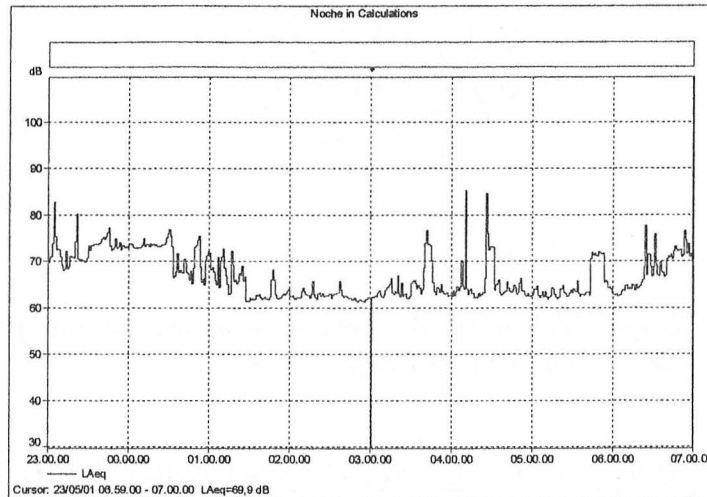
DIA 23 DE MAYO 2001, INTERVALO HORARIO: 24 HORAS

Nombre	Hora de inicio	Duración	LAeq [dB]	LAFMa x [dB]	LAFMin [dB]	LAF1 [dB]	LAF5 [dB]	LAF1 0 [dB]	LAF5 0 [dB]	LAF9 0 [dB]	LAF9 5 [dB]	LAF9 9 [dB]
Nivel Total	23/5/01 0.00	24.00.00	73,2	95,4	58,1	84,4	77,9	76,1	68,3	62,6	62	61,2



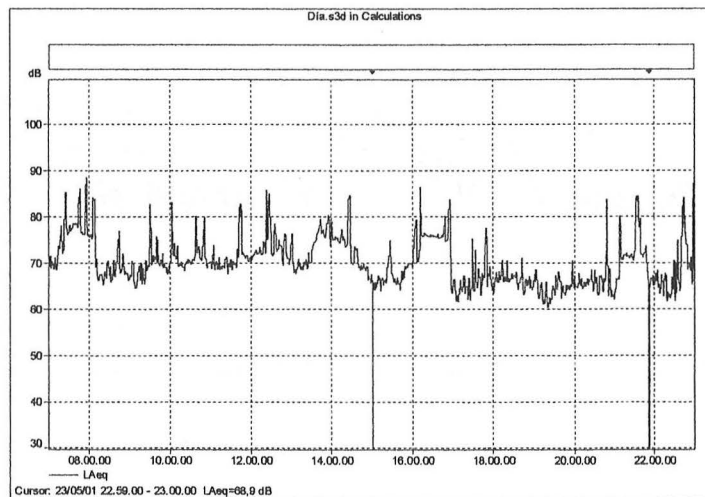
AEROPUERTO DE BARAJAS. DIA 23 DE MAYO
NOCHE

Nombre	Hora de inicio	Duración	LAeq [dB]	LAFMa x [dB]	LAFMin [dB]	LAF1 [dB]	LAF5 [dB]	LAF1 0 [dB]	LAF5 0 [dB]	LAF9 0 [dB]	LAF9 5 [dB]	LAF9 9 [dB]
Nivel Total	22/5/01 23.00	8.00.00	70	91,6	59,6	78,3	74,5	73,5	64,4	62	61,7	61,2



AEROPUERTO DE BARAJAS. DIA 23 DE MAYO 2001
DIA

Nombre	Hora de inicio	Duración	LAeq [dB]	LAFMa x [dB]	LAFMin [dB]	LAF1 [dB]	LAF5 [dB]	LAF1 0 [dB]	LAF5 0 [dB]	LAF9 0 [dB]	LAF9 5 [dB]	LAF9 9 [dB]
Nivel Total	23/5/01 7.00	16.00.00	74,1	95,4	58,1	85	79	76,7	69,3	64	62,8	61,2



6.5 EL RUIDO EN LA CONSTRUCCIÓN.

La causa más importante de ruido en la construcción se debe a la maquinaria empleada en la misma, generalmente de gran tamaño, que origina unos ruidos de carácter continuo, con un amplio rango de niveles y con componentes impulsivas. Tampoco es desdeñable el ruido producido por vehículos pesados que traen o llevan material a la obra.

En los últimos años el nivel de ruido ha aumentado en la construcción debido al uso de maquinaria de gran volumen que emite ruidos de alto nivel sonoro, por supuesto la duración de la obra es menor.

El ruido producido en la construcción se distingue claramente del producido en la industria, sus características fundamentales son:

- Es producido por maquinaria y actividades muy variadas, cuyos espectros y niveles varían ampliamente a lo largo de la obra.
- Básicamente los ruidos se producen en espacios abiertos.
- Las zonas en las que se producen los ruidos pueden ser con unos condicionantes acústicos especiales.
- Tienen una duración limitada, aunque hay obras de larga duración.

Los ruidos que produce la construcción dependen de las características de la fase en que se encuentre la misma. Según sus características acústicas, la Agencia de Medio Ambiente estadounidense (Environmental Protection Agency), establece cinco fases consecutivas en la construcción:

- 1.- Preparación del terreno, incluyendo la demolición de la estructura existente.
- 2.- Excavación
- 3.- Cimentación, incluyendo reacondicionamiento de firmes, compactación y entibación de zanjas.
- 4.- Levantamiento de estructura, forjados, tabiques, ventanas y conducciones en general.
- 5.- Terminación, incluyendo pavimentación y limpieza.

La tabla siguiente muestra los niveles sonoros continuos equivalentes producidos por estas cinco fases en distintos tipos de construcciones. Las columnas A o B dependen de que en la obra este presente todo tipo de maquinaria,(A),o que esté la maquinaria mínima imprescindible,(B).

FASE	TIPO DE CONSTRUCCIÓN							
	VIVIENDAS		OFICINAS, HOSPITALES HOTELES		APARCAMIENTOS, GARAJES, ALMACENES		OBRAS PÚBLICAS	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1	83	83	84	84	84	83	84	84
2	88	75	89	79	89	71	88	78
3	81	81	78	78	77	77	88	88
4	81	65	87	75	84	72	79	78
5	88	72	89	75	89	74	84	84

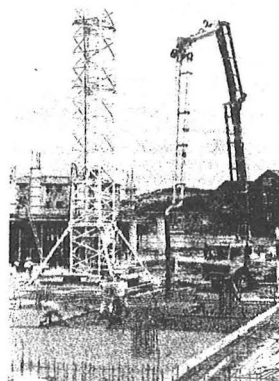
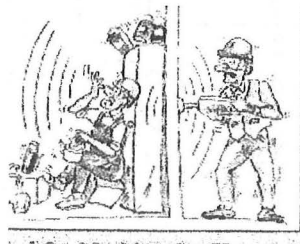
Las fases de excavación y de terminación son las más ruidosas.

El tipo de maquinaria utilizado en la construcción se puede clasificar en:

- Maquinaria para movimiento de tierras: bulldozers, palas mecánicas, apisonadoras, etc.
- Maquinaria para el manipulado de materiales: grúas, mezcladoras, instalaciones de bombeo, etc.
- Maquinaria estática: bombas, compresores, generadores eléctricos, etc.
- Los niveles sonoros que emiten varían de forma importante de un modelo a otro dentro del mismo tipo y también en función de la operación que realizan.

En la tabla siguiente se muestran algunos de los rangos de valores típicos de ruido de maquinaria:

Tipo de maquinaria		Rango de L_{Ap} , a 15 m
Movimientos de tierra	Compactadores	74-76
	Palas cargadoras	72-84
	Retroexcavadora	74-93
	Tractores	78-96
	Niveladoras	80-93
	Asfaltadoras	86-88
	Camiones	84-94
Manipulación de materiales	Mezcladoras	75-87
	Bombas de hormigonar	82-84
	Grúa móvil	76-87
	Grua	87-89
Maquinaria estacionaria	Bombas	69-71
	Generadores	72-82
	Compresores	74-86
Maquinaria de impactos	Martillo pilón	82-98
	Picos de impacto de martillo pilón	95-106
Otros	Vibradores	70-81
	Sierras	74-81



6.6 MOLESTIAS PRODUCIDAS POR EL RUIDO DE TRÁFICO

La mayoría de los cambios en la situación del ambiente general audible de ruido se describen adecuadamente mediante el nivel sonoro corregido día-noche anual con ponderación A para exteriores. La molestia a largo plazo de la comunidad por la exposición al ruido puede expresarse como una función del nivel sonoro corregido día-noche. En 1978 Schultz publicó un estudio amplio sobre la molestia producida por los medios de transporte. En su trabajo relacionó el porcentaje de población altamente molestada por el ruido de los medios de transporte y el nivel sonoro día-noche corregido promedio mediante un polinomio de tercer grado. Los resultados han sido muy utilizados para estudiar la respuesta media de la población al ruido ambiental.

Posteriormente se han realizado estudios más amplios. Según el trabajo de Fidell, Barber y Schultz; "Updating a dosage-effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise, J. Acoust. Soc. Am, vol 89, n°1, 1991, la relación funcional se describe por una expresión cuadrática que explica aproximadamente el 45% de la varianza en el conjunto de los datos. Analizaron 18 encuestas a población de la respuesta de las personas frente a ruidos de aviones, tráfico en las calles, autopistas y trenes.

$$P = 0,036.L_{dn}^2 - 3,27.L_{dn} + 79,14 \quad [6.14]$$

P = Porcentaje de población muy molesto

Esta relación es aproximada en los siguientes casos: 1) únicamente se ajusta dentro de la gama de los niveles sonoros corregidos día-noche de 45 a 85 dB(A); 2) asume que la molestia está producida exclusivamente por variables acústicas; 3) asume que las diferencias entre dos comunidades con la misma exposición sonora no son sistemáticamente explicables.

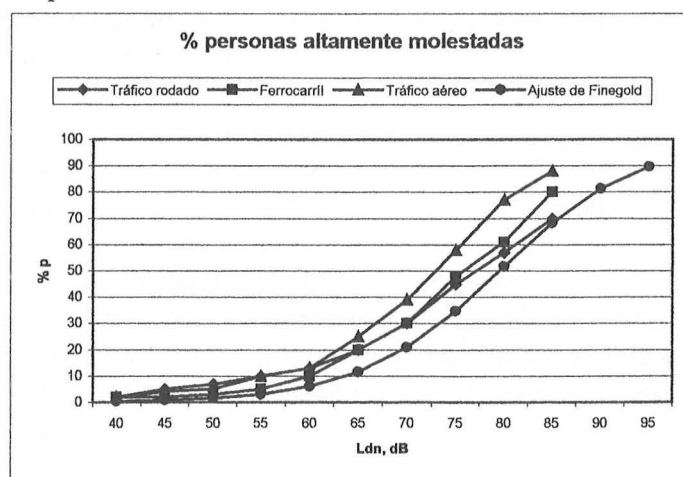


Figura 6.14: Porcentaje de personas molestadas por diferentes tipos de tráfico.

Finegold y al(1994), recomiendan la siguiente curva de ajuste

$$\%p = \frac{100}{1 + e^{(11,3 - 0,14L_{dn})}} \quad [6.15]$$

Esta curva ajusta muy bien con los datos obtenidos anteriormente por Schultz y Fidell y permite predicciones del porcentaje de personas molestadas pero no alcanza el 0% ni el 100%.

7.- BARRERAS ACÚSTICAS

7.1.- INTRODUCCIÓN

En los últimos años el ruido originado por el tráfico de ferrocarriles y automóviles ha aumentado de forma importante, convirtiéndose en una de las grandes molestias para la población. A su disminución se dedican cada vez mayores recursos económicos.

Cuando la planificación urbanística no es la adecuada, es necesaria la consideración del aislamiento al ruido aéreo de las fuentes de ruidos exteriores a los edificios, y para este fin se utilizan las barreras acústicas.

Una *barrera acústica* o *pantalla acústica* es un obstáculo que debido a su situación y propiedades, se coloca entre una fuente sonora y un determinado receptor. La barrera tiene que tener un tamaño mayor que las longitudes de onda procedentes de la fuente sonora. Se suele utilizar el nombre de *pantalla acústica*, para distinguirla de otros tipos de barreras, a aquellos obstáculos sólidos de pequeño espesor, relativamente opacos al sonido. Tienen como usos preferentes el control de ruidos procedentes del tráfico de automóviles, trenes y maquinaria, en este último caso tanto en el exterior como en el interior de un recinto.

Desde los trabajos pioneros en 1915 de Mc Donald, hasta las aproximaciones muy utilizadas de Redfearn (1940), Maekawa (1968), Kurze (1971), un gran número de modelos de cálculos de la atenuación de una barrera, existen en el mercado. Para valorar las propiedades del aislamiento y absorción acústica de las pantallas se han establecido diversas normas nacionales e internacionales.

En la década de 1950 J.B. Keller extendió la teoría de la óptica geométrica para incluir los fenómenos de difracción. Introdujo los rayos difractados, algunos de los cuales pueden penetrar en la zona de sombra. Los rayos difractados se producen cuando los rayos procedentes de una fuente se encuentran en su propagación con una arista, esquina, vértice, o superficie de forma rasante. Una vez desarrollada la teoría fue preciso disponer de datos experimentales para verificarla, según las diferentes configuraciones geométricas y para un rango amplio de longitudes de onda. Este trabajo lo realizó Z. Maekawa en sus trabajos de Doctorado (1965-66). En la década de 1970 se realizaron una gran toma de datos experimentales con propuestas de diversos modelos prácticos. A partir de 1980 se aplican las técnicas de cálculo numérico a resolución de problemas ambientales, y hoy en día los estudios de simulación por ordenador son muy importantes.

7.2.- TIPOS DE BARRERAS ACÚSTICAS

Existen diversas clasificaciones de las barreras acústicas en función de criterios tales como su comportamiento acústico frente a la absorción sonora, sus características estructurales, materiales constitutivos, altura, forma, etc.

Una clasificación según sus características constructivas, puede ser la siguiente:

Pantallas acústicas: son las barreras constituidas por elementos de pared relativamente delgada, verticales o inclinados, con o sin cumbre, con distinta absorción sonora. Son

las más habituales y suelen adoptar diferentes formas y utilizar diferentes materiales: hormigón, madera, vidrio, elementos metálicos, plásticos, elementos prefabricados con material absorbente. Sus propiedades varían mucho de un modelo a otro y su eficacia depende de forma muy importante de su instalación.

Diques de tierra: son un tipo de barrera inclinada formada por tierra con grandes espesores en la base. Sus propiedades de absorción sonora se aumentan plantando vegetación. Se debe tener cuidado con los fenómenos de dispersión producidos por ramas y hojas.

Cubrimiento total o parcial de la vía de circulación.

Pantallas vegetales: están formadas por masas de vegetación muy densas. Únicamente son eficaces si su anchura es apreciable.

Carreteras hundidas: se pueden considera como un caso particular de pantallas dobles. Haciendo que la carretera pase a un nivel inferior al del terreno, su eficacia aumenta de 5 a 10 dB(A).

Construcciones especiales, suelen ser combinaciones de las anteriores.

7.3.- ATENUACIÓN DEL SONIDO MEDIANTE PANTALLAS ACÚSTICAS

Una pantalla acústica es un obstáculo sólido relativamente opaco al sonido, interpuesto entre la fuente sonora y el receptor. Tienen como usos preferentes el control de los ruidos procedentes del tráfico rodado y de maquinaria, en este último caso tanto en exteriores como interiores. Un objeto es considerado una barrera cuando su proyección horizontal sobre perpendicular al segmento que une al emisor y al receptor debe ser mayor que la longitud de onda de la frecuencia central de la banda de octava utilizada.

La eficacia de una pantalla acústica se mide generalmente mediante las pérdidas por inserción, (Insertion Loss), IL. Se define la *perdida por inserción* de una pantalla acústica, para una determinada banda de frecuencia, en un punto dado, a la diferencia entre los niveles de presión acústica en ese punto antes y después de estar la pantalla construida.

$$IL = L_p(\text{antes}) - L_p(\text{después}) \quad \text{dB} \quad [7.1]$$

La atenuación del ruido mediante una pantalla depende fundamentalmente de: dimensiones de la pantalla, distancia entre el emisor y el receptor, espectro sonoro del ruido, material del que está construida la pantalla, y características acústicas del lugar donde se va a instalar. La colocación de una pantalla generalmente disminuye la atenuación debida al suelo.

La magnitud física *atenuación sonora* de una pantalla acústica, $Att_{1/2}$ no se debe confundir con las pérdidas por inserción IL. Se define la atenuación por difracción del borde superior de una barrera semiinfinita por la expresión:

$$Att_{1/2}(f) = 10 \log \left| \frac{p_{barr}(f)}{p_{free}(f)} \right|^2 \text{ dB} \quad [7.2]$$

donde $p_{barr}(f)$ y $p_{free}(f)$ son el espectro de los valores de presión sonora existentes en el punto de medida en presencia de la barrera y en ausencia de esta, respectivamente. En esta expresión no se tiene en cuenta el efecto del suelo y se considera que la barrera es muy larga. No se considera la difracción por los bordes laterales.

Efecto de la pantalla.

La colocación de una pantalla entre el emisor y el receptor produce en la zona del receptor una disminución del nivel de presión sonora. Debido a la presencia de la pantalla se producen fenómenos físicos de reflexión, absorción, transmisión y difracción.

El receptor situado detrás de la pantalla en la zona de sombra, recibe la energía sonora transmitida y la difractada. Si la pantalla está bien diseñada, la energía sonora transmitida es muy inferior a la difractada.

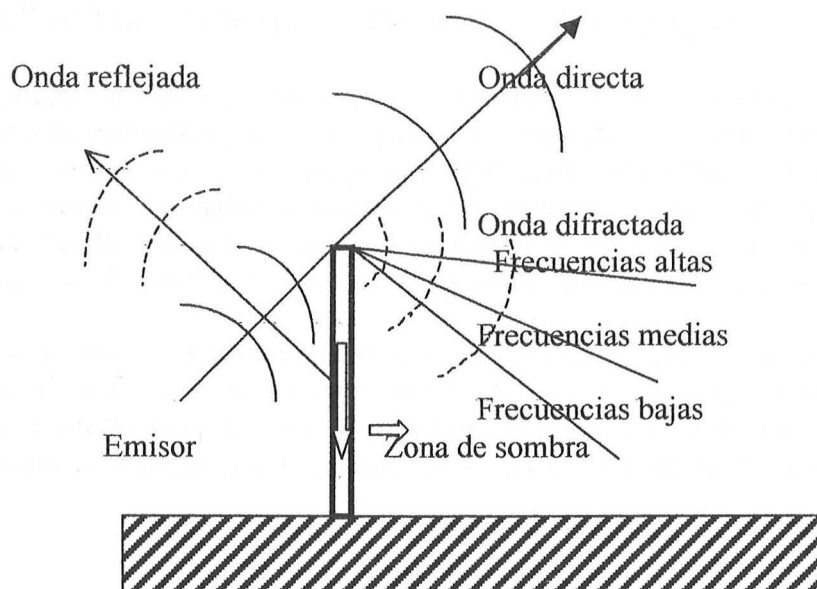


Figura 7.1: Efectos del apantallamiento

Las pantallas acústicas difractan la onda incidente, de forma que su atenuación está muy influenciada por la frecuencia, siendo mayor a altas frecuencias. En la práctica la atenuación máxima por difracción de una barrera es aproximadamente 24 dB. Una forma útil de aumentar la atenuación de las barreras es mediante la colocación de materiales absorbentes en la cumbrera, disminuyendo de esta forma la energía difractada.

Para el cálculo de la atenuación total de una barrera se debe incluir, además de la atenuación por difracción, la atenuación por transmisión, entonces la atenuación total está dada por:

$$A_{TOTAL} = -10 \lg [10^{-0,1A_d} + 10^{-0,1A_T}] \quad \text{dB} \quad [7.3]$$

La pérdida por transmisión de una barrera debe ser aproximadamente 6 dB mayor que la atenuación por difracción. En consecuencia una barrera no tiene que ser maciza. En la mayoría de los casos, una barrera con material con una masa de densidad superficial entre 15 y 20 kg/m² es suficiente.

7.4.- PANTALLA ACÚSTICA DELGADA MUY LARGA.

Consideramos el caso en el que la fuente sonora es puntual. Las pantallas acústicas delgadas ilimitadas atenúan el sonido únicamente por difracción, su masa por unidad de superficie debe de ser al menos de 15 kg /m², para que el sonido transmitido a su través no influya en el nivel sonoro del punto de recepción.

En 1940 Redfearn elaboró un ábaco en el que se obtiene la atenuación de la pantalla por difracción, en función de la distancia desde el borde de la pantalla a la recta que una la fuente con el receptor. Considera como parámetro el ángulo formado entre el rayo que va desde la fuente al borde de la barrera y el rayo difractado por el borde de la barrera que llega al receptor. La figura 7.2 muestra el citado ábaco.

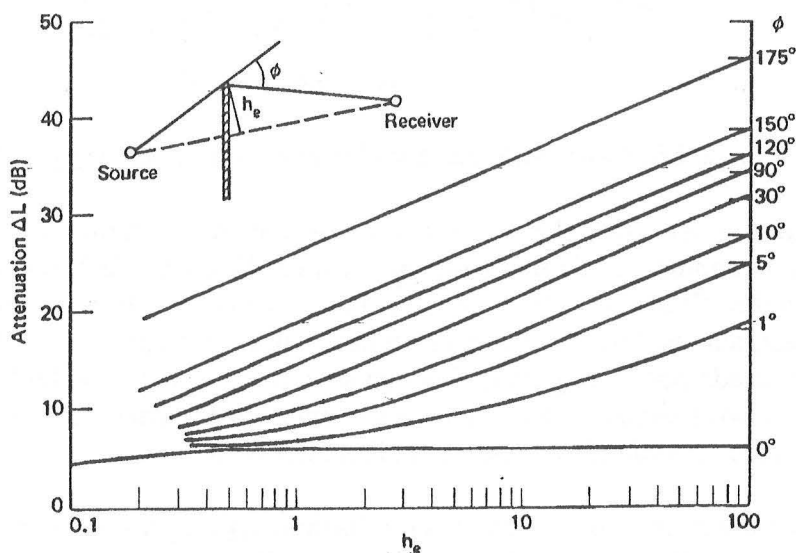


Figura 7.2: Ábaco de Redfearn

Los trabajos de Maekawa fueron realizados en un recinto anecoico, midiendo la presión difractada por una pantalla rígida y delgada, utilizando tonos puros de una fuente omnidireccional. Los resultados obtenidos se representaron en una gráfica en función del número adimensional de Fresnel, N.

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad \delta = a + b - d \quad [7.4]$$

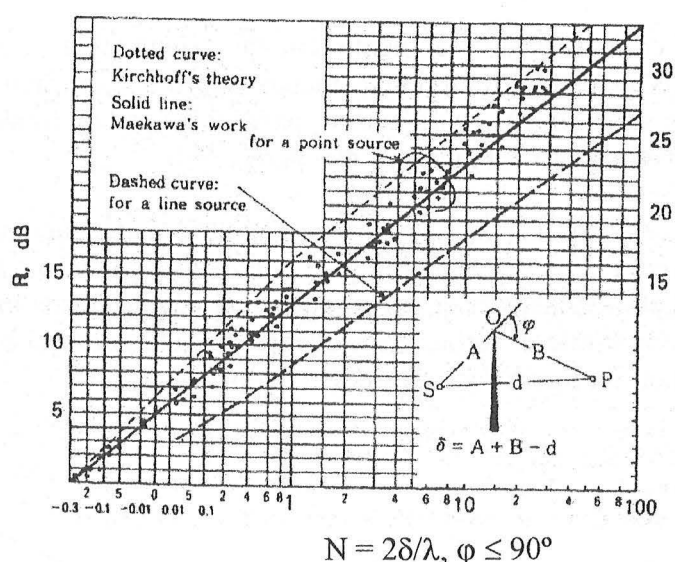
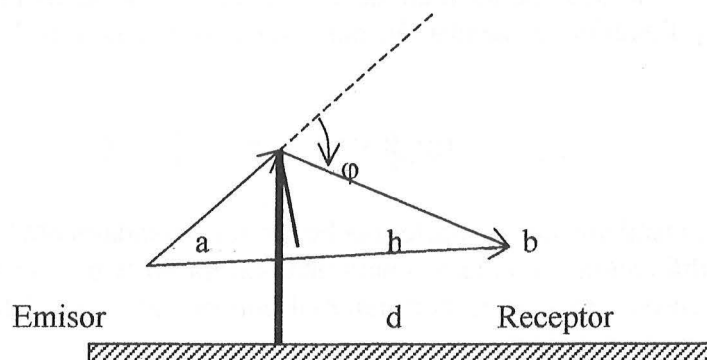


Figura 7.3: Ábaco de Maekawa para una pantalla semi-infinita en campo libre.

Estos resultados experimentales constituyen un método sencillo y fiable para la predicción de la atenuación de una pantalla acústica. El ábaco de Maekawa es uno de los más utilizados. Si $N = 0$ la línea SOP es recta, cuando $N < 0$, el receptor está en la zona iluminada, aún así hay una pequeña atenuación. En la región $N > 1$ la atenuación puede ser expresada por $10 \cdot \log(20N)$. Cuando se construye una pantalla las reflexiones del suelo y de otros objetos se deben tener en cuenta. Posteriormente, Maekawa amplió su método de cálculo teniendo en cuenta el efecto del suelo.

Posteriormente diversos autores establecieron fórmulas que se ajustaban a los resultados de Maekawa, entre ellos destacan las propuestas por Kurze, Tatge y Rathe. Todos estos métodos permiten evaluar la atenuación de una pantalla debida a la difracción pura.

$$Att_{1/2} = 10 \cdot \lg 20N \text{ dB} \quad N \geq 1 \quad (\text{Kurze}) \quad [7.5]$$

$$Att_{1/2} = 10 \cdot \lg(3+20N) \text{ dB} \quad N \geq 0 \quad (\text{Tatge}) \quad [7.6]$$

$$Att_{1/2} = 13 + 10 \lg N \text{ dB} \quad N \geq 1 \quad (\text{Rathe}) \quad [7.7]$$

En 1971 Kurze y Anderson desarrollaron una expresión sencilla para la atenuación de una barrera acústica, situada en un campo acústico producido por una fuente puntual esférica.

$$Att_{1/2} = 20 \cdot \lg \left[\frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} \right] + 5 \text{ dB para } N \geq -0,2 \quad [7.8]$$

$$Att_{1/2} = 0 \text{ dB para } N \leq -0,2 \quad [7.9]$$

$$Att_{1/2} \leq 24 \text{ dB}$$

El último término nos indica un valor máximo de la atenuación que no puede ser superado, la causa fundamental es la turbulencia atmosférica.

Cuando $N \leq -0,2$, *zona de brillo*, la onda difractada es despreciable y la pantalla tiene una atenuación nula. En la *zona de sombra*, la atenuación de la pantalla varía desde 5 dB a bajas frecuencias, hasta un máximo de 24 dB. Cuando el suelo es blando, en la práctica se obtienen atenuaciones inferiores a las previstas por la fórmula, en las bandas de octava de 250 y 500 Hz, esto se debe a la interferencia destructiva de las ondas reflejadas en el suelo con la onda directa antes de la construcción de la pantalla, interferencia que no se produce cuando existe la pantalla.

Kurze y Anderson extendieron el modelo de fuente puntual a una fuente lineal, sustrayendo de 2 a 8 dB de los valores correspondientes a una fuente puntual.

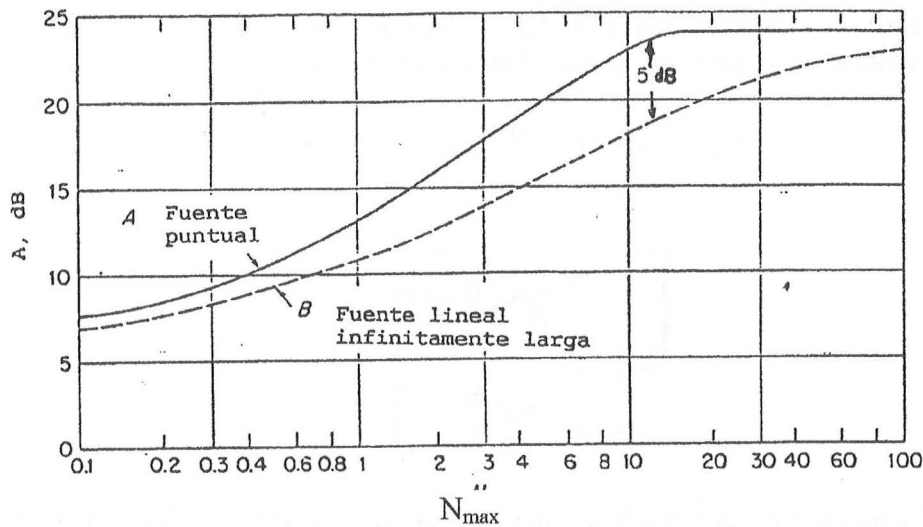


Figura 7.4: Atenuación sonora de una pantalla infinita para fuente puntual y fuente lineal

Tatge para una pantalla semi-infinita y fuente lineal propone la atenuación siguiente:

$$Att_{1/2} = 10 \cdot \lg(3 + 20N) - (20N)^{0,3} \text{ dB} \quad N \geq 0 \quad [7.10]$$

Para calcular la atenuación por inserción de una pantalla según la ISO 9613-2:1996(E), se utiliza la siguiente expresión:

$$IL_{\text{pantalla}} = A_{\text{pantalla}} - A_{\text{suelo}} = 10 \lg (3 + 10NK) - A_{\text{suelo}} \text{ dB} \quad [7.11]$$

donde : N es el número de Fresnel $N = \pm 2 \delta / \lambda$ $\delta = a + b - d$
 $N \geq -0,1$

K es un factor de corrección que tiene en cuenta factores atmosféricos.

Para distancias emisor-receptor inferiores a 100 m, $K = 1$

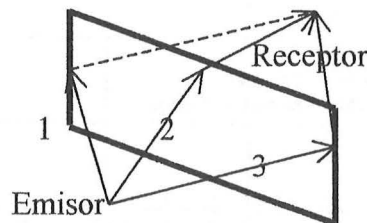
A_{suelo} , es la atenuación producida por el suelo *antes* de que se hubiese colocado la pantalla.

Cuando se obtienen valores negativos de las pérdidas por inserción, se consideran iguales a cero. La atenuación de la barrera en cualquier banda de octava, no se deberá tomar mayor de 20 dB en el caso de difracción sencilla y de 25 dB en el caso de doble difracción, barreras gruesas.

7.5.- PANTALLA DE LONGITUD FINITA

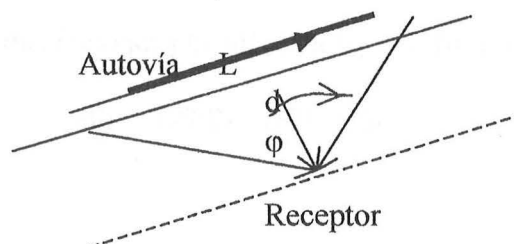
En este caso hay que tener en cuenta la reducción de la atenuación debido a la difracción por los laterales de la pantalla. La atenuación resultante se obtiene componiendo la atenuación de los tres caminos, por la parte superior y por los lados, considerados como pantallas infinitas. En la atenuación por difracción alrededor de los bordes verticales, no se tiene en cuenta el efecto del suelo.

$$IL_T = -10 \log(10^{-0,1IL_1} + 10^{-0,1IL_2} + 10^{-0,1IL_3}) \text{ dB} \quad [7.12]$$



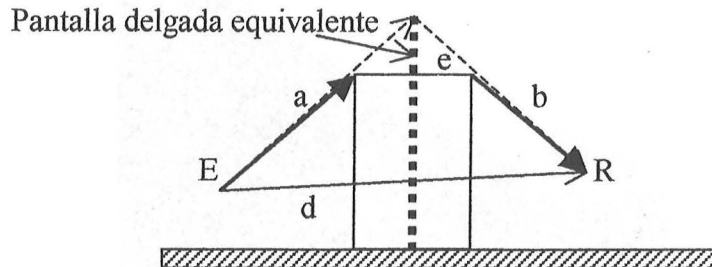
De forma aproximada, la atenuación acústica producida por una barrera de longitud finita que se ve con un ángulo ϕ desde el receptor, se obtiene mediante la expresión

$$A_{\phi} = A_{\pi/2}^{\frac{\phi}{180}} \text{ dB} \quad [7.13]$$



7.6.- BARRERA GRUESA

Una barrera gruesa es la que atenúa el sonido mediante difracción doble. Ejemplos: edificios, taludes de tierra, etc. La barrera se puede sustituir por una pantalla delgada equivalente, según la figura adjunta



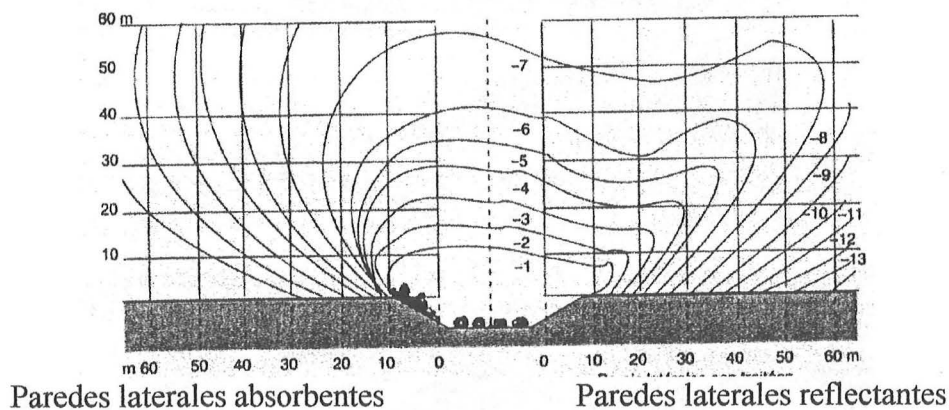
La pérdida por inserción de una barrera gruesa se puede calcular según la ISO 9613-2:1996(E) mediante la expresión:

$$IL = 10 \cdot \log (3 + 30NK) - A_{\text{suelo}} \quad [7.14]$$

$$N = \frac{2}{\lambda} (a + e + b - d), \text{ e es el espesor de la barrera.}$$

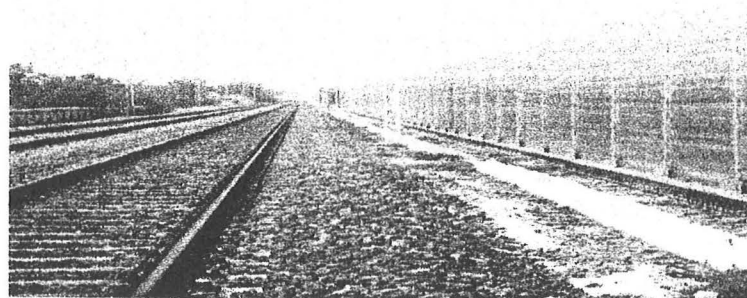
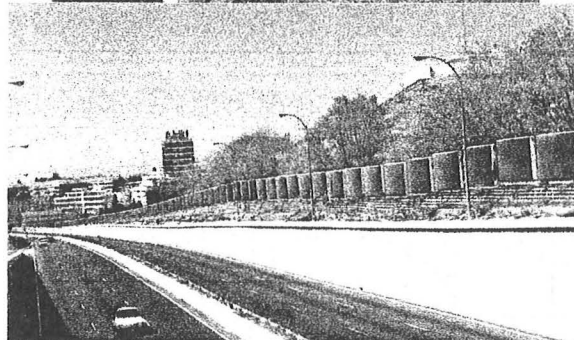
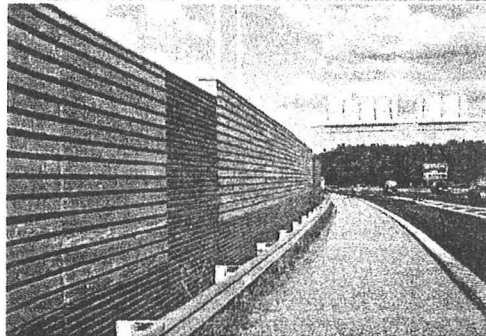
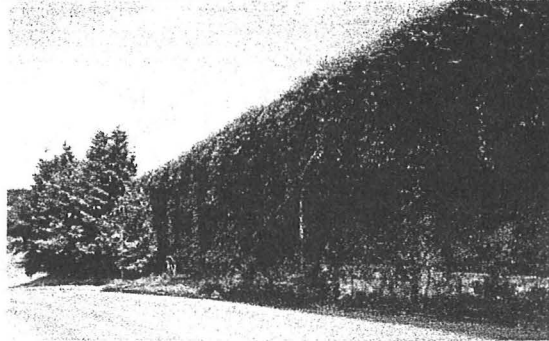
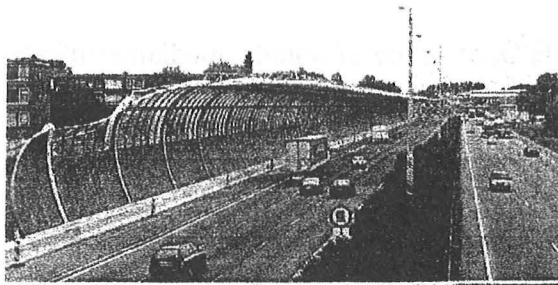
Si el espesor e de la barrera es mayor de 3m, se considera que la barrera es gruesa para todas las bandas de frecuencia. Si el espesor es menor de 3 m, la barrera se considera gruesa para todas las bandas de frecuencia cuya longitud de onda sea inferior a $e/5$. Si no se cumplen estas condiciones la barrera se considera como una pantalla delgada.

7.7.- MEJORA DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE UN TERRAPLÉN CON VEGETACIÓN



Las carreteras en trinchera son generalmente eficaces para reducir el nivel sonoro. Puede disminuir el nivel de presión sonora de 5 a 10 dB(A) en función de su profundidad. Su eficacia es mayor cuando sus paredes laterales son absorbentes.

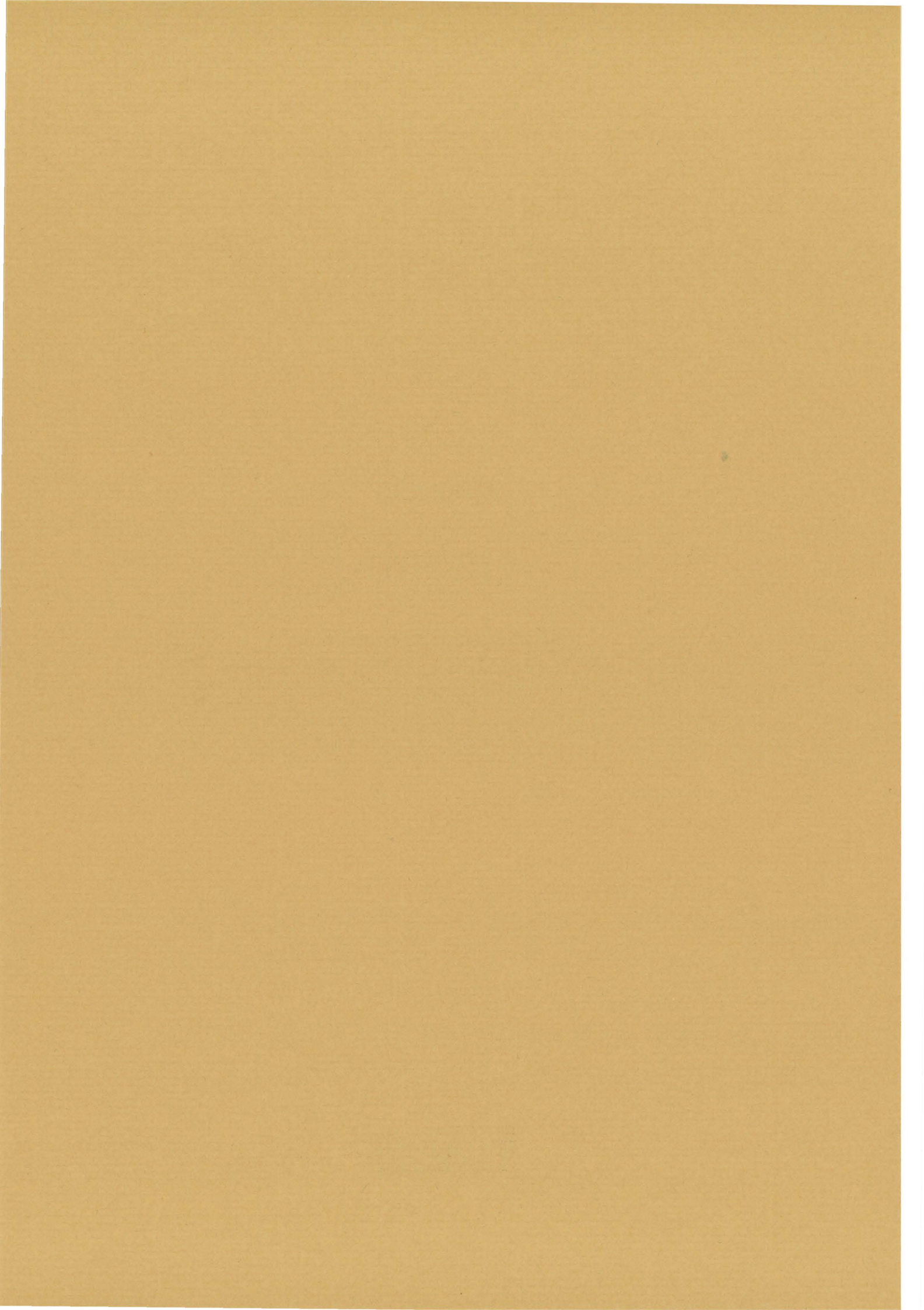
EJEMPLOS DE BARRERAS ACÚSTICAS



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Beranek, L., Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
- [2] CETUR. Guide du bruit des Transports Terrestres. Prévision des niveaux sonores. Bagneaux, 1990.
- [3] Department of Transport and Welsh Office. Calculation of road traffic noise, HMSO, Londres, 1988.
- [4] Embleton, T.F.W. Sound Propagation outdoors – Improved predictions schemes for the 80's. Noise Control Engineering Journal, Vol 18, nº 30, 1982.
- [5] Harris, C., Acoustical Measurements and Noise Control, Mc Graw Hill, New York, 1991. Existe una versión en español.
- [6] ISO 9613-1:1993, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors-Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.
- [7] ISO 9613-2:1996, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors-Part 2: General method of calculation.
- [8] Keller J.B. Geometrical Theory of diffraction. J. Opt. Soc. Am., 52, 116-130, 1962.
- [9] Kurze U.J., Anderson G.S., Sound attenuation by barriers, Appl. Acoust., 4, 35-53, 1971.
- [10] Kurze, U.J. Noise reduction by barriers. J. Acoust. Soc. Am., 55, 504-518, 1974.
- [11] Lara, Sthepens,. Noise Pollution, John Wiley & Sons, London, 1986.
- [12] Makawa, Z., Noise reduction by screens, App. Acoust., 1, 157-173, 1968.
- [13] Nelson, P. Transportation Noise. Reference Book. Butterworths, London, 1987.
- [14] Piercy J.E., Embleton T.F.W., Sutherland L.C., Review of sound propagation in the atmosphere, J. Acoust. Soc. Am., 61, 1403-1418, 1977.
- [15] Rathe E.J., "Note on Two Common Problems of Sound Propagation", J. Sound Vib. 10(3), 472-476, 1969.
- [16] Redfearn, S. W., Some acoustical source –observer problems. Phil. Mag. Ser. 7, 223-236, 1940.
- [17] Tatge, .B. Noise reduction of barrier walls., Arden House Conference, 1972.

NOTAS



CUADERNO

124.01

CATÁLOGO Y PEDIDOS EN

<http://www.aq.upm.es/of/jherrera>
jherrera@aq.upm.es

